

Prototipo de Sistema de Control Fuzzy Aplicado al Proceso de Curado de Tabaco Virginia

Miguel A. Azar, Sergio L. Martínez, Jesús M. Manero

Facultad de Ingeniería / Universidad Nacional de Jujuy

Av. Italia y Av. Martearena / S. S. de Jujuy / Provincia de Jujuy/Tel. 0388-4221591

auazar@live.com, smartinez@fi.unju.edu.ar, jmanero@fca.unju.edu.ar

Resumen

El aprovechamiento de las ventajas de la inteligencia artificial en el ámbito de la producción de cultivos industriales es uno de los elementos en los que muchas soluciones se apoyan para lograr un producto acorde a las exigencias del mercado. Dentro del dominio de la IA los sistemas Fuzzy Logic constituyen una de las técnicas más clásicas para el diseño de sistemas de control inteligentes. El presente proyecto trata acerca del desarrollo de un prototipo fuzzy para el control de estufas de curado de tabaco.

Palabras clave: Cultivos industriales, Fuzzy Logic, Inteligencia Artificial, Secadero Bulk Curing, Sistema de control, Tabaco Virginia.

Contexto

El presente proyecto está basado en un trabajo interdisciplinario entre las Facultades de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la UNJu. Por otro lado, la documentación fue extraída de dossiers elaborados por la Cámara del Tabaco de Jujuy y Massalin Particulares.

Introducción

La lógica fuzzy se concibe como un paradigma diferente del procesamiento de la información y es muy útil para la representación de datos inexactos, incompletos y el manejo de la incertidumbre [Kasavob, 1998].

El conjunto de características que reúne la técnica fuzzy la convierten en la herramienta ideal tanto para la representación de datos inciertos como para el control de sistemas que habitualmente son manejados por expertos. Las estufas empleadas para el secado de tabaco actualmente son manipuladas por expertos (o estuferos) que utilizan una sucesión de reglas ambiguas que no pueden ser modeladas mediante la lógica convencional.

El proceso del curado

La producción de tabaco es un proceso que se desarrolla en cuatro fases [Guzmán Pérez *et al.*, 1983], que son: 1) cultivo, 2) Recolección, 3) Curado (o secado de la hoja) y 4) Procesado. El *curado* es la fase de mayor importancia y se define como el proceso mediante el cual se dirigen las reacciones biológicas (químicas) de la hoja de tabaco para lograr la calidad prefijada. Para el tabaco tipo Virginia se emplea el curado “a fuego indirecto” [1] mediante estufas a gas que permiten, a través del calor que generan, “amarillar” y secar las hojas de tabaco. La estufa consiste en una cámara o recinto cerrado que utiliza calor artificial proveniente de la combustión de gas. Actualmente se ha extendido el uso de estufas Bulk-Curing o de Circulación Forzada [Agrovisión NOA, 1997]. Por ello el curado se realiza en forma semiautomática, debiendo ser necesaria la intervención de una persona (“estufero”) dedicada completamente al control de

dicho proceso. Este control difiere de acuerdo a la hoja con la que se esté tratando. Las hojas se clasifican por la posición que ocupan en el tallo (pisos foliares) [Llanos Company, 1981]. Los pisos foliares son: Bajera, Media o Superior.

El proceso de curado

El curado es un proceso de secado o pérdida de agua en condiciones controladas para que las hojas de tabaco, mantengan el mayor tiempo posible su actividad biológica a fin de que los cambios químicos y bioquímicos se produzcan del modo más apropiado para conseguir un producto de alta calidad [Llanos Company, 1981]. El curado se divide en 4 fases: 1) Amarillamiento (o *amarilleo*), 2) Fijación de color, 3) Secado de lámina y 4) Secado de nervadura (o *secado de vena*). En ellas el operador o estuero manipula las válvulas de gas a fin de lograr un control de temperatura que depende de la madurez, la humedad inicial y el piso foliar del cual provienen las hojas.

No existe un programa o secuencia absoluta de pasos a seguir para lograr un estufado exitoso. Cada bibliografía proporciona diferentes formas de llevar a cabo el control del estufado no obstante ello, la curva de temperatura y humedad relativa que debe emplear el estuero, depende de varios factores.

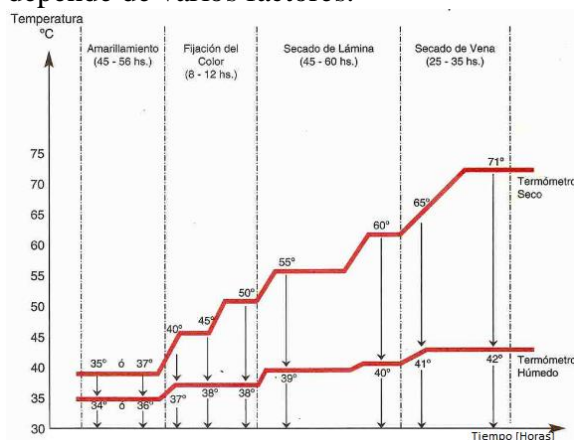


Figura 1

Análisis y modelado

Para el caso en estudio, se puede observar una tendencia muy notable de requisitos definidos en forma ambigua. Así por ejemplo, durante la educación el experto emplea la expresión siguiente: *“Para comenzar el amarilleo hay que medir la temperatura de bulbo seco en ese momento. Si es alta se abre la válvula de gas al mínimo para que aumente la temperatura lentamente”*. Esto denota claramente que desde el punto de vista lingüístico existen definiciones imprecisas tales como: “alta”, “mínimo” y “lentamente”. El hecho de que las expresiones vertidas por parte del experto tengan características difusas no significa que sean inconsistentes. El principal control efectuado por parte del estuero es el de la apertura de la válvula de gas para aumentar o disminuir la temperatura en el interior de la estufa. El estuero a partir de una temperatura de referencia, ajusta la apertura de la válvula de gas de manera que el error entre lo medido y lo deseado sea nulo.

Análisis y modelado de las entradas de referencia

Ahora bien, la mayoría de los sistemas de control posee una entrada de referencia constante, sin embargo para el caso en estudio el estuero mantiene una referencia variable. La temperatura de referencia para el experto está regida por una gama de curvas predeterminadas. Esta situación se ve reflejada en la Figura 1, en donde se puede observar que a medida que avanza el tiempo la temperatura se va incrementando gradualmente hasta llegar a un máximo de 71 °C.

La variación de temperatura de referencia va a estar en función de las siguientes condiciones iniciales a saber: 1) *Madurez de la hoja*. La hoja que ingresa al secadero puede estar verde, madura o sobremadura (estos son valores nítidos). 2) *Piso Foliar*.

Es la procedencia o ubicación de la hoja respecto al tallo y puede ser bajera, media, superior o corona. Las hojas de la parte media y superior poseen el mismo cuerpo o grosor, por lo tanto son indistintas para el experto. 3) *Temperatura inicial*. Es la temperatura que posee la estufa antes de iniciar el curado. Esta puede ser alta o baja. 4) *Fase*.

La temperatura inicial es un parámetro fuzzy ya que el estuero la define como alta o baja. En palabras del experto “una temperatura baja es de unos 20 °C. A partir de los 25 °C a 30 °C ya es alta”.

La Fase tiene una definición precisa (amarilleo, fijación de color, secado de lámina y secado de vena), sin embargo el momento de cambio de una fase hacia la otra no está nítidamente definido. La bibliografía especializada y los expertos coinciden en que no se inicia una fase una vez que finaliza la anterior sino que el cambio de fase es gradual. Esto es lo que permite definir a esta variable como fuzzy (Figura 2).

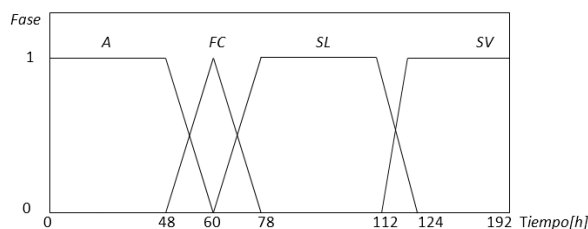


Figura 2

Este conjunto de variables condiciona las decisiones a tomar por parte del experto sobre como realizará el estufado. Dicho de otro modo, el experto posee un programa diferente de curvas de temperatura para cada combinación de variables iniciales. Este conjunto de combinaciones están modeladas en la Tabla 1.

		AG				
		N	B	ME	A	MA
d(AG)	N	N	LEP	LIP	VP	VP
	B	LEN	N	LEP	LIP	VP
	ME	LIN	LEN	N	LEP	LIP
	A	VN	LIN	LEN	N	LEP
	MA	VN	VN	LIN	LEN	N

Tabla 1

Análisis y modelado del sistema controlado

Para el caso en estudio el *sistema controlado* representa a la estufa o secadero. Muchos sistemas dinámicos ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, etc., pueden ser caracterizados por ecuaciones matemáticas [Ogata, 1980].

La apertura de la válvula de gas también es una variable fuzzy dado que el experto define el control de su apertura o cierre mediante expresiones lingüísticas difusas, tales como: “mínimo”, “máximo”, “menos del máximo” y “un poco más del mínimo”. La salida del FIS (Fuzzy Inference System) de control es la apertura de gas (AG). El universo en discurso está comprendido entre 0 y 1 (0 apertura nula, 1 apertura máxima).

El experto hace referencia a “aumentar lentamente la temperatura” o “mantener la temperatura sin dejar enfriar el secadero”, es por ello que el resultado de las reglas también se expresa en esos términos

La base de reglas pertenecientes al control de la apertura de gas está diseñada a partir de la plantilla de reglas de MacVicar-Whelan [Cheong, 2008]

Implementación

En la Figura 3 se presenta el modelo del prototipo de sistema desarrollado en Simulink®. Se trata de un sistema continuo de simulación normal cuyo tiempo límite se estableció en 11.520 unidades de tiempo. Este valor se determinó debido a que cada intervalo de tiempo representa un minuto (el tiempo máximo de estufado son 8 días, es decir 11.520 minutos).

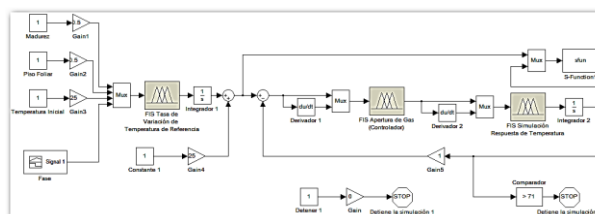


Figura 3

Este modelo hace uso S-functions que proporcionan un mecanismo eficaz para ampliar las capacidades del entorno Simulink® [2].

Un S-function es la descripción del lenguaje máquina de un bloque de Simulink® [MathWorks, 2001].

Líneas de Investigación y desarrollo

Como resultado del trabajo realizado se pueden inferir las siguientes líneas de investigación futuras que permitirían complementar y adicionar nuevas características al sistema bajo estudio: 1) Desarrollo de un controlador híbrido neuro-fuzzy en donde la incorporación de una red neuronal artificial pudiera capturar e incorporar a la base de conocimientos – en tiempo real–, las actividades del operario. 2) Desarrollo de un control central multiplexado de n estufas con un solo computador o microcontrolador, con posibilidades de control a distancia.

Resultados y objetivos

Objetivo Principal

Desarrollar un prototipo de sistema de control fuzzy aplicable al curado del tabaco Virginia sobre estufas Bulk Curing.

Objetivos Secundarios

- Conocer y utilizar un entorno matemático de simulación computacional que permita el desarrollo y la aplicación de técnicas basadas en lógica fuzzy.
- Investigar y analizar los parámetros que emplean los expertos en el curado de tabaco, para modelar un conjunto de variables de control apropiadas.
- Diseñar un Modelo de Inferencia Difuso mediante el uso de herramientas de diseño fuzzy para la configuración de las variables manipulables.

La lógica fuzzy, además de su utilización muy difundida y relativamente reciente en sistemas de control, es una buena alternativa para el modelado de sistemas

controlables en los cuales su función transferencia es desconocida o bien de difícil configuración matemática debido a su alta complejidad.

El empleo del entorno MATLAB® constituyó un excelente medio para la determinación de los resultados del modelo y la constatación con los datos empíricos en forma rápida y confiable.

Los resultados obtenidos a través de las diferentes gráficas generadas por el sistema fueron contrastados con mediciones efectuadas *in situ* en estufas Bulk Curing, para las mismas condiciones de entrada, mediante el empleo de un registrador de temperatura electrónico.

Para la evaluación del prototipo, se tomó como parámetros de comparación las pendientes obtenidas y el tiempo total de cada fase en el sistema contra los mismos parámetros medidos en casos exitosos de mediciones sobre estufas Bulk Curing. Las pendientes comparadas fueron tomadas por tramos, es decir para cada fase del proceso se consideró su pendiente por separado. Para obtener las pendientes de las curvas medidas se las linealizó utilizando el método de mínimos cuadrados. En la Figura 4 se muestra una gráfica de una medición realizada con los siguientes parámetros: Estufa: Bulk Curing, Madurez del Tabaco: Maduro, Piso Foliar: Superior, Temperatura Inicial: 26 °C.

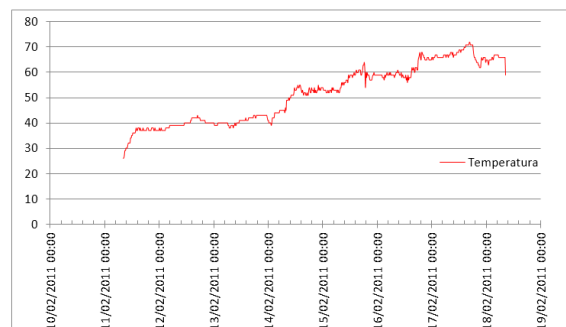


Figura 4

El eje de ordenadas graduado entre 0 y 100 representa la temperatura en grados Celsius. La curva posee al inicio un valor de 26 °C y de 71 °C al finalizar el proceso

de curado. Los picos y valles observados en las curvas denotan la complejidad de controlar en forma manual la temperatura. La Figura 5 ilustra la aplicación una vez ejecutada la simulación. Se puede apreciar la linealización de la curva para los mismos parámetros de entrada.

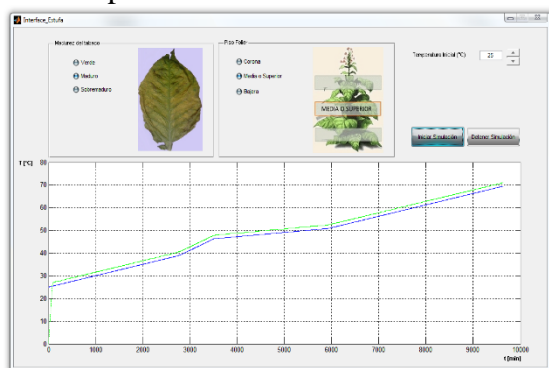


Figura 5

La linealización como puede observarse se realizó por tramos, en donde cada uno de estos representa una fase del proceso de curado,

Formación de recursos humanos

El equipo de trabajo estuvo formado por: Ing. Sergio Martínez (Facultad de Ingeniería - UNJu), Ing. Jesús Manero (Facultad de Ciencias Agrarias - UNJu), Ing. Miguel Azar (Facultad de Ingeniería - UNJu), Cr. Roberto Strizic y Sr. Candelario Casasola.

Referencias

[Agrovisión NOA, 1997] Revista Agrovisión NOA - Compendio tabacalero, *Circulación Forzada y Optimización de Estufas*. Editor: Horacio David & Asociados. (1997)

[Cheong, 2008] Cheong F., *A hierarchical fuzzy system with high input dimensions for forecasting foreign exchange rates*. Int. J. Artificial Intelligence and Soft Computing, Vol. 1, No. 1. (2008).

[Guzmán Pérez *et al.*, 1983] Guzmán Pérez, J. L. Muñoz Muñoz B. *Recolección*

y Curado de los Tabacos Amarillos Tipo Virginia. Hojas Divulgadoras Núm. 11/83. Publicaciones de Extensión Agraria. Neografis. Madrid, España. (1983).

[Kasabov, 1998] Kasabov, N. K. *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering* The MIT Press. London, England. (1998).

[Llanos Company, 1981] Llanos Company, M. *El Tabaco - Manual Técnico para el Cultivo y Curado* Ediciones Muni-Prensa. Madrid, España. (1981).

[Ogata, 1980] Ogata, K. *Ingeniería de Control Moderna* Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Minnesota, USA. (1980).

Referencias Web

[1] Philip Morris International *Growing Tobacco*[online].<http://www.pmi.com/en/g/our_products/growing_tobacco/pages/growing_tobacco.aspx>, consultada el 19 de Febrero de 2011.

[2] MathWorks® R2011b *Documentation Simulink® - What is an S-function?* [online].<<http://www.mathworks.com/help/toolbox/simulink/sfg/f6-21998.html>>, consultada el 09 de Junio de 2011.